

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04075

研究課題名(和文) 鉄骨置屋根構造の地震被害解消を目的とした応答制御型支承の研究

研究課題名(英文) Research on response-control bearings for mitigating earthquake damages of steel roof gymnasium supported by RC frames

研究代表者

竹内 徹 (Takeuchi, Toru)

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：80361757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,300,000円

研究成果の概要(和文)：鉄骨置屋根構造とはRC片持ち架構の上に鉄骨屋根が設置された形式の体育館等の空間構造を指す。東日本大震災ではこういった体育館の支承部が多くの損傷を受けた。支承部損傷の主原因のひとつとしてRC片持ち架構の構面外応答が指摘されているが、そのメカニズムや有効な改修・設計手法は確立していなかった。

本研究では、鉄骨屋根とRC片持ち架構の複雑な地震応答特性を明らかにするとともに、従来の滑り支承、ゴムパッドを用いた弾性支承、エネルギー吸収機能を持つ摩擦支承の実大実験、免震支承を導入した屋根架構の振動台実験を実施し、屋根架構の補強を不要とする改修・設計手法の提案、実用化および設計法の提示を行った。

研究成果の概要(英文)：Numerous steel roof bearings in RC gymnasiums were damaged at the 2011 Tohoku Earthquake. These damages are considered to be mainly due to out-of-plane response of cantilevered RC walls; however, their mechanisms are not clear.

In this research, complicated response characteristics of these roof and RC walls are made clear. The real scale mock-up experiments of PTFE sliding bearings, friction damper bearings, and rubber sheet bearings are carried out, followed by the shaking table test for seismically isolated roofs. From these results, detailed construction methods for eliminating the damages without strengthening the roof, followed by proposing the evaluation methods. Also the steel roofs supported by seismic isolation bearings are investigated, followed by shaking table tests and response evaluations.

研究分野：建築構造・防災

キーワード：学校体育館 耐震性能 防災拠点 避難所

1. 研究開始当初の背景

2011年東日本大震災では災害時に避難施設として重要な機能を持つ学校体育館や公共ホール等の空間構造の多くが損傷を受けた(図1)。2000年以降に設計された体育館でも多くの被害が発生し、現行設計法・耐震改修法の不備が明らかになっている。被害を受けた施設にはRCの片持ち架構の上に鉄骨屋根が支承部を介して設置されいわゆる「鉄骨置屋根構造」が多く見られる。本構造では鉄骨置屋根がコンクリート柱頭またはコンクリート梁にアンカーボルトとベースプレートを用いた支承部で定着される場合が多く、破壊形式は支承部の a)アンカー破断、b)定着部コンクリートの側面破壊・剥落、c)均しモルタルの粉砕が見られる。同種の被害例は阪神大震災でも報告されたが、その後建設された建物でも同様の被害が発生しており、改善が見られない。支承部に加わる力の主要原因としては屋根架構と連成したRC壁片持ち架構自身の構面外応答が指摘されているものの、その応答特性は殆ど解明されていないのが現状であった。従って屋根応答に基づきアンカー部を鉄板等で補修し屋根ブレースを補強する現状の改修方法では安全性が確保されていない可能性が高い。屋根架構に比べ重量の大きいRC片持ち架構の応答を支承部と屋根架構で拘束することは困難かつ不経済であり、有効な補強方法が確立していないのが現状である。

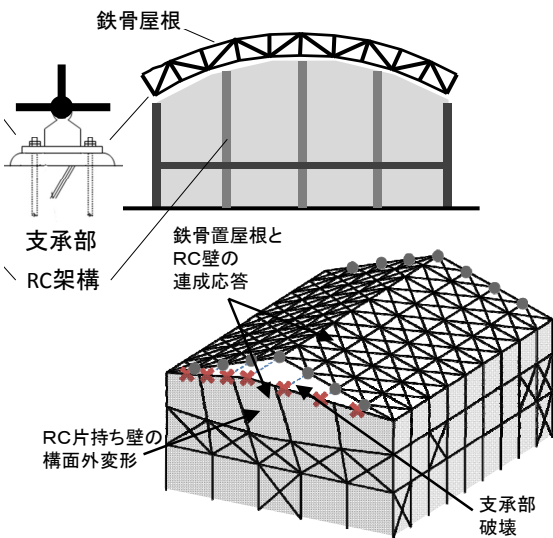


図1 鉄骨置屋根構造支承部の被害例

2. 研究の目的

本研究では、上記の課題に対し、RC片持ち架構の振動エネルギーを支承部に設けられた弾性・弾塑性要素で消散させ、反力と最大変位を許容範囲内に制御することで支承部被害を抜本的に解消する手法の実用化を試みる。具体的には鉄骨置屋根構造の地震応答性状を詳細に分析した後、ゴムシート支承、摩擦ダンパー支承および球面すべり支承を用いた応答制御型支承の導入によりRC片持ち架構および屋根部の応答を制御し、屋根架構の補強を不要とする効率的な改修・設計手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究は3年の計画にて実施した。初年度はまずモデル体育館における地震応答特性の分析と支承部の反力評価、改良支承部の試設計を行うとともに設定された既存支承部の繰り返し載荷実験を実施し、過去の震災での破壊メカニズムを明らかにした。次年度は改良支承部の試作および繰り返し載荷実験を実施し、その耐力・変形性能および履歴特性を確認するとともに、得られた特性を用いてモデル体育館における支承部・屋根架構の応答評価を行い、目標性能が得られていることを確認した。また、屋根部への免震支承の導入効果についても検証し、最終年度では球面滑り支承を用いた縮小屋根架構振動台実験を実施し、得られた結果を元に改良各応答制御型支承の簡易な設計法の提案を行った。

4. 研究成果

4-1: エネルギー吸収型摩擦ダンパー支承の実験的研究

まず2015年度では検討用の鉄骨置屋根体育館モデルを設定してRCアンカー部を含む80%縮小試験体を製作し、繰り返し加力実験による耐力および破壊形式の確認を行った(図2, 3)。さらに検討対象となる応答制御型支承のうち、スライディングしながらエネルギー吸収を行うエネルギー吸収型摩擦ダンパー支承を試作し、静的・動的繰り返し加力実験による履歴特性、軸力・振幅・振動数依存性を確認した。その結果、摩擦ダンパーの滑り耐力をアンカーボルト定着部の側面破

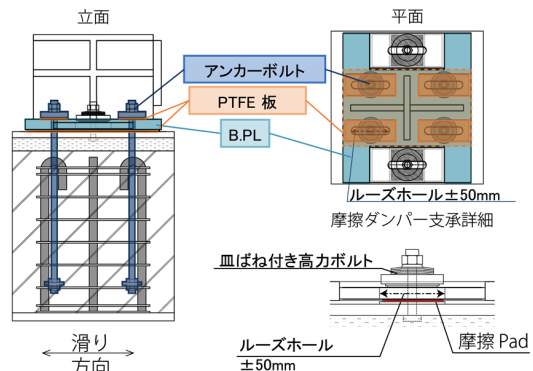


図2 エネルギー吸収型摩擦ダンパー支承

壊耐力以下に滑り荷重を抑えることで定着部および均しモルタルの破壊が抑制し得ることを確認した(図4)。ゴムシート支承については、同支承を適用した既存体育館の微動測定を行い、RC片持ち架構の動的特性について分析を行った。

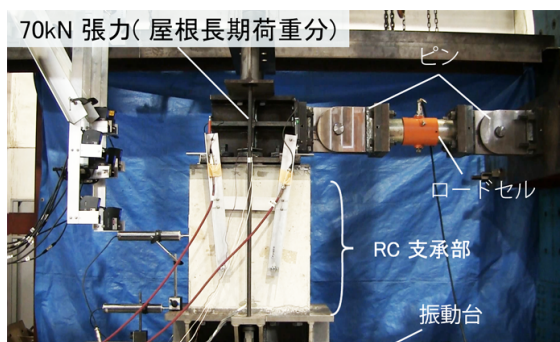


図3 摩擦支承部実験

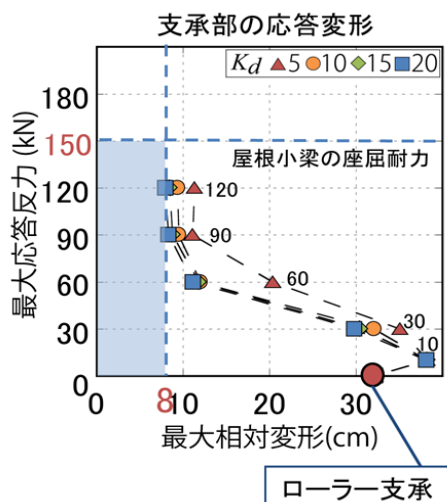


図4 摩擦支承の滑り耐力とRC壁応答

続いて上記実験で得られた履歴特性を用いて、さまざまな形状の鉄骨置屋根体育館モデルを設定し、各モデルにおけるRC片持ち架構の構面外応答と屋根架構部の水平・鉛直応答の連成効果を分析することにより、鉄骨屋根支承部の応答せん断力を評価する手法を提案した。また、静的・動的繰り返し加力実験により得られたエネルギー吸収型摩擦ダンパー支承の履歴特性を組み込むことで、支承部の応答せん断力及び変形が定着部の破壊クライテリア以下に制御可能である

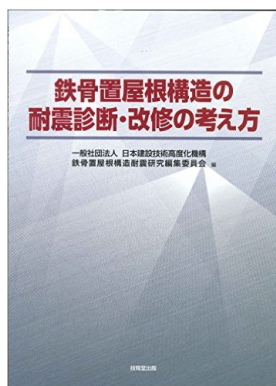


図5 鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方、日本建設技術高緯度化機構、技報堂出版、2015

ことを確認した。また、エネルギー吸収型支承を用いた際の応答低減効果に関する簡便な評価法を導出した。

以上の成果は6編の審査付き論文および7編の学会発表(うち2編は国際会議)で発表し、さらに被害事例の分析と合わせて著作として出版した(図5)。

#### 4-2: 球面滑り支承(SSB)を用いた免震屋根構造の要素実験および解析的検討

エネルギー吸収型摩擦ダンパー支承と並行して、屋根支持部に免震支承を導入した場合の屋根応答低減を目指した検討にも取り組んだ。鉄骨屋根は軽量のため、免震支承としては支持重量に関係なく固有周期の設定が可能な球面滑り支承(SSB)が適していると考えられるが、具体的な検討はあまり進んでいない。2015年度ではまずSSBの2方向振動台実験を実施した。本実験では地震波の2方向入力により、1方向入力に対し応答変位が増大する傾向が確認された。得られた特性を再現した解析モデルによる応答特性の分析を行った結果、応答変位の増大メカニズムを明らかにするとともに上部構造の応答加速度が低減される傾向があるなどの貴重な結果を得た。その応答特性を分析するとともに、球面滑り支承の多方向振動を精度よく模擬できる解析手法の構築を行った(図6)。2016年度には構築した支承履歴モデルを用いて典型的な学校体育館にSSB支承を導入した際の屋根部応答の低減効果の確認、並びに応答評価手法の提案を行った(図7)。

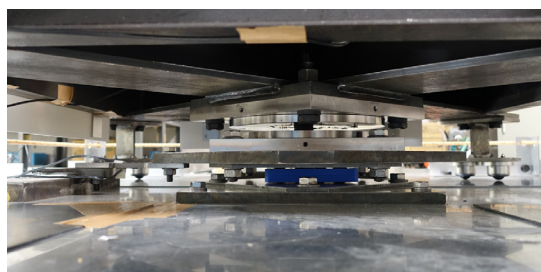


図6 球面滑り支承(SSB)2方向振動台実験

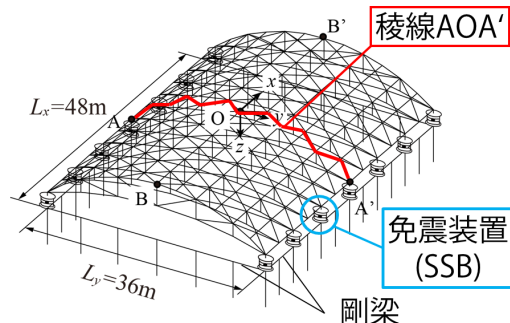


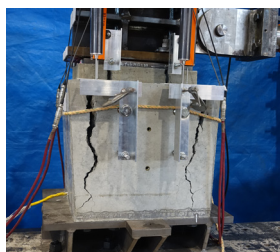
図7 SSBを用いた屋根免震体育館の検討

#### 4-3 脆弱モルタルを有する滑り支承、ゴム支承および摩擦ダンパー支承の実験的研究

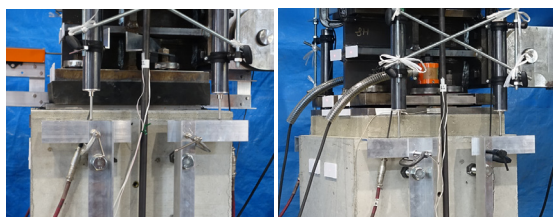
2016年度は2015年度の支承部実験に加え、均しモルタルでの破壊が予想される厚い均しモルタルを有するPTFE滑り支承試験体、

モルタル部をゴムシートに置き換えたゴム支承試験体、および摩擦ダンパー型支承を脆弱モルタルの上に組み込んだ試験体の3種を製作し、動的繰返し載荷実験および終局破壊実験を行った(図8)。従来型試験体ではアンカー部の側方破壊が発生し、過去の地震被害で見られたのと同様の破壊形式が再現された。また、ゴム支承試験体では面圧・振動数の依存性が観察されるなど興味深い結果が得られた。

2016年12月には同年4月に発生した熊本地震による体育館被害の調査を実施し、6件の体育館において、実験と同様の支承部被害、およびRC壁振動および屋根部の応答励起が原因と考えられる部材被害が発生していることを確認した(図9)。ゴムシート支承を適用した宮城県内の体育館については、引き続き微動測定およびドローンによる観察を行った。



(a) PTFE 滑り支承の最終破壊状況



(b) ゴム支承 (c) 摩擦支承  
図8 各種支承部繰返し載荷実験



図9 2016 熊本地震における体育館被害

以上の実験結果及び被害調査より、こういった支承部および支持部周辺の屋根部材損傷は、RC壁の構面外応答と屋根架構自身の励起された応答が複雑に連成し生じていることが予想される。

そこで、滑り支承実験で得られた履歴モデルを用いてRC支持部を有する典型的な学校体育館解析モデルを構築し、屋根のライズのある梁間方向の地震入力に対し、屋根部応答とRC支持架構の構面外応答がどのように連成するかについての詳細な分析を行った。その結果、RC壁の構面外剛性が一定値以下に

なるとRC壁と屋根面が同時に水平方向に変形するモードが卓越するようになり(図10)、屋根部や支承部の応答が既応答評価式を超過する場合があることが明らかになった。これらの効果はRC壁と屋根面が水平方向に振動するモードの周期比 $R_{WT}$ をパラメータとして表現できることを示し、補正式の提案を行った。また、支承部をゴム支承または摩擦支承に交換した場合の応答制御効果について検証し、その設計方法についても提案した。

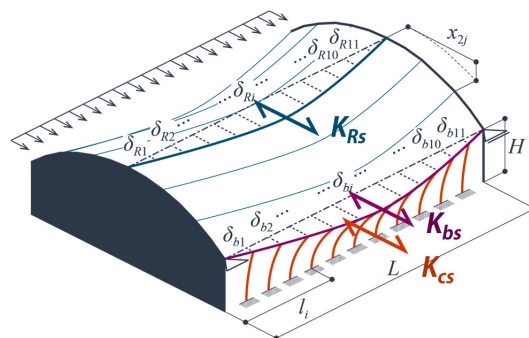


図10 梁間方向のRC壁と屋根の連成モード

以上の成果は6編の審査付き論文および8編の学会発表(うち3編は国際学会)で発表した。さらに、提案したRC片持ち架構の応答評価法および免震屋根構造の設計法については、2016年11月に日本建築学会より出版された「ラチスシェル屋根構造設計指針」に反映され、東京・大阪で講習会が実施された(図11)。



図11 ラチスシェル屋根構造設計指針、日本建築学会、2016

#### 4-4 SSBを用いた屋根免震構造振動台実験

ラチス屋根の振動台実験については、2015年度より取り組んでいたが、最終年度となる2017年度はラチスシェル屋根構造支持部に免震支承を導入した際の地震応答低減効果についての検証実験を実施した。具体的には免震支承に球面滑り支承(SSB)を用いた縮小試験体を製作し、水平・鉛直同時載荷振動台実験を行うことで、屋根部応答の測定・分析を行った。屋根免震構造の振動台実験は過去に事例があまりなく、貴重な知見となる。実験の結果、以下の知見が得られた(図12)。

1)地震動入力レベルの増大に伴いSSBが滑りはじめ、免震効果による屋根部応答低減効果

が顕著となる(図 13)。2)水平・鉛直地震動を受ける SSB に支持された屋根型円筒ラチスアーチの応答は、水平、鉛直 1 方向入力時の応答の時刻歴やまたは最大応答の二乗平方根により再現できる。また、鉛直入力加速度が鉛直下向きに大きくなる場合、SSB の面圧が小さくなり、応答低減効果は小さくなる。3) 数値解析において、SSB を MSS モデルでモデル化することにより、SSB に支持された屋根型円筒ラチスアーチの応答を再現できる。4) 水平地震動を受ける SSB に支持された屋根型円筒ラチスアーチの応答加速度分布は、既往文献による免震層の等価剛性評価およびラチスシェル屋根構造設計規準において提案されている屋根面の応答加速度の予測式を用いることにより評価可能である。5) 非免震モデルにおいては、地震動の入力レベルが大きくなるに従い、有限曲げ変形により、鉛直応答加速度分布が二山型から一山型に変化し、既往の予測式における応答分布とは異なる形状となる場合があることが分かった。

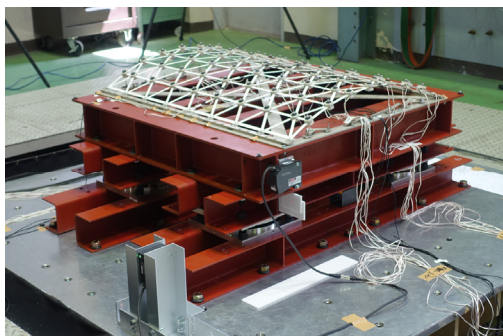


図 12 SSB 免震屋根構造の振動台実験

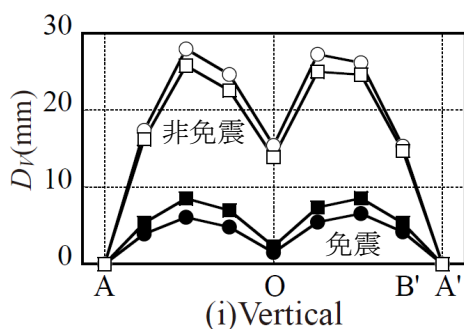


図 13 免震支承の効果

以上の成果は8編の審査付き論文および18編の学会発表(うち2編は国際会議)で発表したほか、5編の審査付き論文を投稿中である。また上記成果を含めた空間構造の応答制御手法およびその応用例のうち、座屈拘束ブレースを応用したものについては、英文専門書「Buckling-Restrained Braces and Applications」として日本免震構造協会より出版し、国内外に発表した(図14)。他1件の空間構造の数値解析に関する出版を行った。

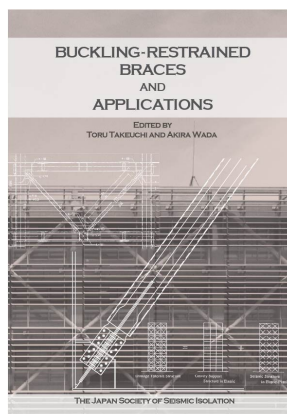


図 14 Buckling-Restrained Braces and Applications, JSSI, 2017

以上、3年間の研究を通じて RC 片持ち架構で支持された鉄骨置屋根構造の地震応答性状およびその被害メカニズムが概ね明らかとなり、支承部の耐震診断手法および耐震補強設計法の提案を行うとともに、学会設計指針や啓蒙書として内外に発表することができた。

また、屋根架構の補強を行うことなく RC 片持ち架構の応答を制御するエネルギー吸収型摩擦ダンパー支承の提案を行い、実大実験を行ってその特性を明らかにするとともに、有効な設計法を示した。同支承は既に静岡県公共体育館の耐震改修に採用されており、今後の普及発展が期待される。また、支承部の損傷回避および屋根部の応答低減には免震支承の導入が有効であることを解析・実験を通じて明らかにした。こちらも今後の実施建物への応用が期待される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件、下記抜粋)

- 1) 成田和彦, 寺澤友貴, 前原 航, 松岡 祐一, 松井良太, 竹内 徹: 摩擦ダンパーを用いた鉄骨屋根支承の動的載荷実験および応答評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80 No.717, pp.1717-1725, 2015.11  
DOI <https://doi.org/10.3130/aijs.80.1717> (査読有)
- 2) ZHANG Ruifu CAO Miao TANG Hesheng XIE Liyu, XUE Songtao: Study on the Joint Damage and Retrofitting of a Large Span Structure after the Great East Japan Earthquake, Structure Engineers, No.31, 21-27, 2015 (査読有)
- 3) TAKEUCHI T.: Recent Design Approaches for Passively Controlled Structures, Journal of Disaster Research, Vol.11 No.1,2016.2 (査読有)
- 4) 成田和彦, 竹内 徹, 松井良太: RC 片持ち架構を有する鉄骨屋根体育館支承部の応答評価および設計法, 日本建築学会技術報告集, Vol.22, No.50, pp.41-46, 2016.2 (査読有)

- 5) 竹内 徹、岡田康平、小河利行：支持架構付き自由曲面シェルの地震応答評価、日本建築学会構造系論文集、Vol.81, No.727, pp.1467-1477, 2016.9, DOI <http://doi.org/10.3130/aijs.81.1467> (査読有)
- 6) 竹内 徹、宮崎 崇、小河利行：球面すべり支承で支持された屋根型円筒ラチスシェルの地震応答評価、日本建築学会構造系論文集、Vol.81 No.728, pp.1673-1682, 2016.10, DOI <http://doi.org/10.3130/aijs.81.1673> (査読有)
- 7) 熊谷知彦、六本木元太、清水陸朗：水平・鉛直地震動を受ける屋根型円筒ラチスシェルの振動実験、構造工学論文集、63B, pp.125-132, 2016.4 (査読有)
- 8) 熊谷知彦、下山拓也、小河利行：屋根型円筒ラチスシェルの自由振動特性の違いがTMDによる地震応答低減に与える影響、日本建築学会構造系論文集、Vol.82, No. 738, pp. 1233 ~ 1243, 2017.8 DOI <https://doi.org/10.3130/aijs.82.1233> (査読有)
- 9) 竹内 徹、前原 航、小河利行：正負のライズを有するラチスシェルの地震応答評価、日本建築学会構造系論文集、Vol.82, No. 739, pp.1371-1381, 2017.9 DOI <https://doi.org/10.3130/aijs.82.1371> (査読有)
- 10) 竹内 徹、内田正颯、松井良太：二方向地震入力を受ける球面すべり支承および上部構造の応答特性、日本建築学会構造系論文集、Vol.82, No. 739, pp.1339-1347, 2017.9, <https://doi.org/10.3130/aijs.82.1339> (査読有)
- 11) Wan Chunfeng, Zhao Lei, Ding Youliang, Xue Songtao: A two-phase ranging algorithm for sensor localization in structural health monitoring, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9(1) 1-8, 2017, DOI: 10.1177/1687814016685964 (査読有)

〔学会発表〕(計 32 件, 下記抜粋)

- 1) 前原 航、成田和彦、松岡祐一、脇田直弥、松井良太、竹内 徹：摩擦ダンパー支承を用いた体育館における RC 片持架構の応答制御、日本建築学会学術講演梗概集、2015(構造 I), 679-680
- 2) TAKEUCHI T., MIYAZAKI T., OGAWA T.,: Seismic response evaluation of lattice shell roofs using seismically isolated bearings, *Proceedings of IASS2016*, 2016
- 3) SHIMOYAMA T., KUMAGAI T., OGAWA T.,: Vibration control by plural TMDs for cylindrical lattice shell roofs subjected to vertical earthquake motion, *Proceedings of IASS2015*, 2015

〔図書〕(計 4 件)

- 1) 竹内 徹ほか：鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方、技報堂出版、2015, p131
- 2) 竹内 徹、中澤祥二、熊谷知彦ほか：ラチスシェル屋根構造設計指針(共著)、日本建築学会、2016, p242

- 3) TAKEUCHI T., WADA A., MATSUI R.et. al: Buckling-restrained braces and applications, *JSSI*, 2017, p241
- 4) 熊谷知彦 他 15 名: 建築構造における強非線形問題への数値解析による挑戦, 丸善出版, 2017, p279

〔その他〕  
ホームページ等  
[http://www.arch.titech.ac.jp/Takeuti\\_Lab/index.html](http://www.arch.titech.ac.jp/Takeuti_Lab/index.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

竹内 徹 (TAKEUCHI Toru)  
東京工業大学 環境・社会理工学院 教授  
研究者番号：80361757

### (2) 研究分担者

松井 良太 (MATSUI Ryota)  
東京工業大学 環境・社会理工学院 助教  
研究者番号：00624397

薛 松濤 (XUE Songtao)  
東北工業大学 工学部 教授  
研究者番号：70236107

熊谷 知彦 (KUMAGAI Tomohiko)  
明治大学 理工学部 専任准教授  
研究者番号：70376945